Revista Internacional de
Ingeniería
de Estructuras

Vol. 26, 3, 472-497 (2021)

RELIABILITY AND EXPECTED COST PROCEDURE TO SELECT THE BEST RETROFIT ALTERNATIVE FOR SCHOOLS DAMAGED BY EARTHQUAKES

Alejandra Guadarrama (1), David De León (2)

(1) Estudiante. Maestría en Ciencias de la Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de México. a_donaji_g@hotmail.com
(2) Profesor. Universidad Autónoma del Estado de México. daviddeleonescobedo@yahoo.com.mx

Accepted: August 2021
Published: August 2021

. ABSTRACT

Standards for new structures have been developed in Mexico, but repair criteria and guidelines have not been tuned up as well as the standards for new structures. This paper explores three of the retrofit recommendations included in the technical guide for seismic rehabilitation of the physical educational infrastructure of Mexico, for three schools that suffered damage during the earthquake of September 19, 2017. Those schools are in areas of high seismic hazard, and are evaluated through retrofit reliability, and risk and resilience formulation. For this purpose, the failure probabilities and expected life-cycle costs, per school, are assessed. The limit states that govern the failure are analyzed under resistance and service conditions to calculate a global damage index. Some alternative repair schemes and levels are evaluated to reduce the overall failure probability. The expected life-cycle cost is calculated in terms of the possible consequences of failure, such as possible deaths, loss of content, and cost of loss associated with transferring activities to other facilities while the school is being repaired or rebuilt. The failure probabilities, for the studied schools, were reduce from 0.032 to 0.0029, from 0.041 to 0.0028 and from 0.026 to 0.0026, where the reduced probabilities are the average from the three repair alternatives. The procedure allowed the identification of the bending moment as the dominant failure mode, and the best repair alternative the one with steel angles, in terms of failure probability and expected life-cycle cost reduction.

Keywords: Seismic hazard; Reliability; Resilience; Expected life cycle cost; educational physic infrastructure.

PROCEDIMIENTO BASADO EN CONFIABILIDAD Y COSTOS ESPERADOS PARA ELEGIR LA MEJOR ALTERNATIVA DE REPARACIÓN PARA ESCUELAS DAÑADAS POR SISMO.

RESUMEN

En México se han desarrollado estándares para nuevas estructuras, pero los criterios y pautas de reparación no se han afinado tan bien como los estándares para nuevas estructuras. En este trabajo se exploran tres de las recomendaciones de reparación incluidas en la guía técnica de rehabilitación sísmica de la

DOI: http://dx.doi.org/10.24133/riie.v26i3.2337

infraestructura física educativa de México para tres escuelas ubicadas en áreas de alta amenaza sísmica, que sufrieron daño durante el sismo del 19 de septiembre de 2017, evaluando la confiabilidad de la rehabilitación a través de una formulación de riesgos y resiliencia. Para ello se calculan las probabilidades de falla y costos esperados en el ciclo de vida para cada escuela. Se analizan los estados límite de falla y de servicio en función de la amenaza sísmica de cada sitio. Se evalúan algunas alternativas de esquemas y niveles de reparación para reducir la probabilidad de falla global. El costo esperado en el ciclo de vida se calcula en términos de las posibles consecuencias de la falla, como posibles muertes, la pérdida de contenido, las reparaciones y el costo de pérdida asociado con la transferencia de actividades a otras instalaciones mientras se repara o reconstruye la escuela. Las probabilidades de falla de las escuelas estudiadas se redujeron de 0.032 a 0.0029, de 0.041 a 0.0028 y de 0.026 a 0.0026 donde las probabilidades reducidas son el promedio de las que resultan para las 3 alternativas de reparación. El procedimiento permitió identificar que el modo de falla dominante fue el de flexión y que la alternativa de reparación con ángulos de acero fue la mejor en reducción en probabilidad de falla y en costo esperado en el ciclo de vida.

Palabras clave: Peligro sísmico; Confiabilidad; Resiliencia; Costo esperado del ciclo de vida; infraestructura física educativa.

1 INTRODUCCIÓN

Los edificios pueden sufrir diferentes niveles de daño cuando se someten a excitaciones sísmicas debido a factores como el sistema estructural, las características del sismo, la calidad de la construcción, el mantenimiento de la obra, las propiedades de los materiales, etc. No obstante, con la experiencia adquirida en diversos sismos, se ha observado que el nivel de daños en gran medida se debe a la configuración arquitectónica, estructural y en elevación, así como a los efectos de sitio donde se desplantan las construcciones, como proponen Monserrat, Gómez y Juárez (2021), Tena (2020) y Godínez *et al* (2019).

A partir de los diversos eventos sísmicos que se han presentado en el país, la ingeniería mexicana ha avanzado continuamente, de manera particular, los reglamentos actuales proporcionan una mejor definición de las demandas sísmicas de diseño, de las propiedades de los materiales, así como de los factores y coeficientes de diseño con el objetivo de establecer estándares de seguridad más adecuados de acuerdo con Aguiar, Rivas-Medina e Iza (2018).

El diseño por cargas laterales de una estructura requiere el correcto desempeño de una estructura ante un evento natural generalmente viento o sismos, de tal forma que ésta no presente daños significativos que puedan poner en riesgo la vida de los ocupantes. Debido a ello, los reglamentos de construcción se encargan de definir parámetros, los cuales, en caso de rebasarse, comprometerían la seguridad no solamente de la estructura en sí, sino también la de los usuarios y transeúntes.

Dicho análisis proporciona un panorama general de los posibles daños que pudieron o pueden llegar a presentarse en un evento sísmico, de igual manera, con base a esta información es posible revisar y atender oportunamente este tipo de problemas y así disminuir los efectos nocivos que se ocasionarían a la población. Además, es necesario conocer la confiabilidad que define el nivel de daño esperado

bajo una excitación, por lo que las estructuras se evalúan a diferentes grados de intensidad teniendo como referencia la aceleración de la gravedad suficiente para que falle. Lo comentado anteriormente ha mostrado que el conocer el comportamiento y la confiabilidad en las estructuras es de gran interés, ya que esto permitirá identificar las medidas para minimizar las consecuencias producidas por los eventos sísmicos. Por tal razón, se estudian estructuras representativas a aquellas que se han visto afectadas por eventos sísmicos, para así determinar la repuesta estructural de una edificación ante una amenaza sísmica dada, sobre todo en estructuras para uso educativo.
Se eligieron 3 escuelas donde se observaron daños, que fueron producidos por el sismo de México de 2017, y en donde se corroboró, de manera aproximada, el nivel de daño observado mediante el cálculo de la probabilidad global de falla en condiciones dañadas. Estas probabilidades de falla, y sus respectivos índices de confiabilidad, se compararon con estándares internacionales y valores previamente calculados como límites objetivos (de la minimización del costo esperado en el ciclo de vida) ISO (1998), Ang y De León (1997) y en De León y Guadarrama (2020). Estos límites fueron establecidos para niveles de daño leve, mediano y serio, y sirvieron para comparar, de manera aproximada, las probabilidades de falla de la estructura dañada con los niveles de daño observado y, posteriormente, para validar que las alternativas de reparación tuvieran probabilidades de falla por debajo de dichos límites.

Sismicidad en México y peligro sísmico

La actividad símica en México se debe principalmente a la subducción de las placas Rivera y Cocos bajo la placa de Norteamérica; generando sismos de gran magnitud a lo largo de su historia que han ocasionado daños importantes. Los epicentros de la gran mayoría de los sismos se localizan en los estados de Jalisco, Colima, Michoacán, Guerreo, Oaxaca y Chiapas a lo largo de la costa del Pacífico como establecen Chávez-García, Sánchez-Sesma, Campillo y Bará (1994). Sin embargo, también han ocurrido sismos importantes en el centro y sur de Veracruz, Puebla, Estado de México y la península de Baja California conforme Pérez-Gavilán, Aguirre y Ramírez (2018).

Es posible que a lo largo de la historia del país hayan ocurrido un gran número de eventos sísmicos y probablemente en el futuro seguirán ocurriendo, tal vez la diferencia más importante es el hecho que, actualmente se cuenta con la tecnología suficiente para llevar a cabo registros sísmicos, lo que permite comprender mejor este tipo de fenómenos naturales según Gutiérrez *et al* (2011).

Actualmente existe un consenso general en la comunidad científica con respecto a la zona de más alto potencial sísmico en el país que es la costa de Guerrero, de acuerdo a Singh y Ordaz (1994), a causa de la subducción de las placas de Cocos y Rivera bajo la de Norteamérica. Aunque la frontera entre las placas de Rivera y Norteamérica es algo incierta, se estima que intercepta en la costa de México cerca de Manzanillo (19.1°N, 104.3°W), Rosenblueth (1986). Por ejemplo, los grandes temblores de una fuente dada tienen tiempos de recurrencia de varios decenios cuando se trata de temblores de subducción. Es necesario recalcar que en los últimos 78 años no se ha originado ningún sismo al poniente de Acapulco, a pesar de que su tiempo de recurrencia es de 50 años, por lo que si el área de ruptura se llegase a presentar en dicha zona es posible que el próximo

evento alcance una magnitud de 8.1 o 8.2, además, la distancia que existe con la Ciudad de México es ligeramente menor a la del sismo de 1985 por lo que es probable que la intensidad sea similar o mayor a este último. Singh y Ordaz (1994).

El peligro sísmico se mide por medio de la probabilidad de ocurrencia de un sismo en una zona determinada durante un tiempo específico, cuyos efectos pueden ser representados por una medida de intensidad sísmica, tal como la aceleración máxima del terreno, velocidad máxima del terreno o la aceleración espectral asociada a una razón de amortiguamiento del 5%. Bozzo y Barbat (2004). Es decir, es una medida del grado de exposición que un sitio dado tiene a los movimientos sísmicos referente a las máximas intensidades que en él pueden presentarse. Bazán y Meli (2001).

El peligro sísmico puede expresarse también en términos del espectro de respuesta. Los eventos identificados que están asociados con altas frecuencias (periodos bajos) pueden ser empleados como escenarios para evaluar estructuras rígidas como las de las escuelas. Reinoso y Jaimes (2009). Las características de los escenarios también pueden ser considerados para seleccionar registros del movimiento del terreno que se necesitan para analizar estructuras y verificar el diseño sísmico. Pozos-Estrada, Gómez y Hong (2014).

Prevención de daño estructural en edificios escolares

La planeación, el diseño y la construcción de edificios escolares en zonas de amenaza sísmica ofrecen múltiples desafíos a los diferentes profesionales involucrados, debido a la importancia que tienen dichas construcciones en la vida usual de una comunidad y a la que adquieren en caso de desastre. A pesar de lo anterior, múltiples edificios escolares han sufrido graves daños, llegando incluso al colapso parcial o total de la estructura, como consecuencia de sismos intensos. En este contexto, se ha visto la necesidad de revisar las normas existentes para el diseño y la construcción de nuevos edificios escolares. Respecto a la reparación de las estructuras dañadas en México, el INIFED (2016) ha dedicado algunos trabajos a proveer información práctica en este aspecto, sin embargo, las estrategias no incluyen aún el enfoque basado en la confiabilidad para identificar la seguridad óptima de las reparaciones desde el punto de vista del costo mínimo esperado del ciclo de vida.

Esteva *et al* (2002) han analizado formulaciones para determinar requerimientos para un desempeño apropiado del ciclo de vida bajo amenaza sísmica, incluyendo daño acumulado las funciones de vulnerabilidad sísmica también se han explorado con el objetivo de proporcionar recomendaciones para el diseño y la mejora de las estructuras, incluidos los daños anteriores debido a terremotos o asentamientos pasados debido a cargas de gravedad.

Jaimes y Niño (2017), del Instituto de Ingeniería de la UNAM, recomiendan una metodología para realizar un análisis de costo-beneficio (C / B) para evaluar posibles opciones como la reparación y refuerzo de estructuras centradas en mitigación de pérdidas físicas directas por acciones sísmicas. Ha evaluado los edificios de escuelas públicas ubicados en la Ciudad de teniendo como parámetros la pérdida esperada, la pérdida anual esperada (EAL, por sus siglas en inglés) y la máxima pérdida probable (PML, por sus siglas en inglés). Este equipo también ha

trabajado en determinar los tiempos de recuperación estructural óptimos de escuelas tipo, necesarios para la evaluación de la resiliencia estructural, sometida a eventos sísmicos tomando como base, la implementación de medidas de reparación de daño estructural, cumpliendo con las especificaciones del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, de acuerdo a Morales (2019). El sentido de la reparación y el refuerzo es el contenido en el estándar de la ASCE (2014), que es mejorar el desempeño sísmico de las estructuras.

A nivel internacional la Universidad de Nápoles ha propuesto una metodología de diseño de reparación integrada para la mejora estructural y energética de edificios escolares existentes. Proponen un enfoque de reacondicionamiento incremental que consiste en implementar intervenciones con un impacto creciente, aumento del rendimiento y aumento de costos y beneficios. Se discuten y comparan diferentes soluciones de reparación en términos de desempeño sísmico y energético (incorporando eficiencia y ahorro se energía en un contexto ambiental), beneficios de la intervención, nivel de interrupción y costos directos de implementación, según Del Vecchio *et al* (2020).

En la Universidad de Porto se evalúan varias clases de edificios a través de una revisión exhaustiva de varias técnicas de reacondicionamiento sísmico, presentando estudios numéricos que tiene como objetivo evaluar la eficiencia relativa de dichas técnicas basándose en el análisis de costo-beneficio, de acuerdo con Sousa *et al* (2020).

El University College London inquiere varias medidas de mejoramiento para edificios escolares vulnerables en Filipinas. Específicamente, se analiza el desempeño sísmico de edificios que representan la tipología de edificaciones escolares existentes en dicho país, basado en el diseño sobre las disposiciones del código sísmico. El comportamiento sísmico de esas estructuras se evalúa mediante análisis estático y dinámico, identificando las deficiencias estructurales y proponiendo una serie de opciones de reparación para mejorar su capacidad general, rigidez y ductilidad (D´Áyala et al, 2020).

En este trabajo se exploran tres de las diez recomendaciones de rehabilitación presentadas en la guía técnica de rehabilitación sísmica de la infraestructura física educativa de México (INIFED, 2016), se eligieron considerando el daño mostrado en las tres estructuras elegidas y por ser las técnicas de reparación cuyos materiales son fácilmente asequibles en el país. Las escuelas elegidas se encuentran ubicadas en áreas de alta amenaza sísmica, y la formulación está basada en el riesgo y el costo mínimo esperado del ciclo de vida. Para ello se consideraron las incertidumbres inherentes al peligro y los componentes críticos de resistencia estructural. Se analizan los estados límite que gobiernan la falla, bajo condiciones de resistencia y se evalúa una alternativa de reparación que no sólo permita a la estructura recobrar su nivel de confiabilidad inicial, sino reducir la probabilidad de falla de los elementos a intervenir. El costo se calcula en función de la técnica de reparación y también se integran las posibles consecuencias del colapso, como posibles muertes, pérdida de contenido y costo de pérdida asociado

con la transferencia de actividades a otras instalaciones mientras se repara o reconstruye la escuela.

2 METODOLOGÍA

La metodología utilizada para este trabajo empieza con análisis estructurales no lineales con modelos en 2D, con la demanda de registros sísmicos obtenidos de estaciones acelerográficas ubicadas cerca de cada escuela. La observación de daños se compara, de manera cualitativa y aproximada, con las respuestas máximas obtenidas de los análisis no lineales y, con ellas y las capacidades de los miembros estructurales, se obtienen probabilidades de falla en condiciones dañadas. No se cuenta con el periodo estructural de vibración ambiental ni con las cantidades de varillas refuerzo de las secciones de concreto. La calibración de estos refuerzos se realiza, por ensayo y error, hasta aproximar los rangos de probabilidades de falla que corresponden a los niveles de daño observados, de acuerdo con ISO (1998), Ang y De León (1997) y en De León y Guadarrama (2020). Posteriormente, se realizan análisis espectrales de las escuelas, con distintas alternativas de reparación, de acuerdo con las recomendaciones del Manual de la CFE, como lo describen Hernández *et al.* (2016). En función de la ubicación de cada escuela se determina el espectro de diseño mediante el uso del programa Prodisis, programa de diseño sísmico, 2015. Las coordenadas de ubicación del sitio se introducen al programa, el cual hace uso de su base datos de aceleraciones en roca para todas las zonas sísmicas del país. Asimismo, el programa se alimenta de datos que caracterizan el suelo: la velocidad de propagación de onda de corte y el periodo fundamental del suelo, y realiza el cálculo de los factores de respuesta y el de sitio. Este programa considera que periodo de retorno corresponde a una aceleración máxima con una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años, por lo que el periodo de retorno es de 475 años. Los detalles de lo anterior lo describen Hernández *et al.* (2016). El análisis de la respuesta, con esta demanda, permite calcular las fuerzas producidas por el sismo. El siguiente paso consiste en calcular los cocientes de fuerza entre capacidad para los miembros del edificio, se calculan sus probabilidades de falla de los elementos estructurales. Se analiza nuevamente la estructura considerando la reparación a los elementos con mayor probabilidad de falla y se calculan los nuevos márgenes de seguridad (índices de confiabilidad o probabilidades de falla) y finalmente se evalúa la función del costo esperado en el ciclo de vida para la reparación propuesta. En la siguiente sección se detalla el cálculo de estas probabilidades de falla o índices de confiabilidad. La figura 1 muestra el procedimiento del modelo de reparación propuesto en este trabajo.

Formulación

La probabilidad de falla del edificio se considera como la falla del marco crítico, y la probabilidad de falla del marco se define aquí como la probabilidad de que un efecto de carga, o efecto de combinación de carga, exceda la resistencia de varios miembros estructurales críticos; es decir, que el estado límite de falla G_f (margen de seguridad) se supere de alguna manera, como establece Esteva *et al* (2002). Los miembros estructurales críticos son aquéllos que, al fallar

simultáneamente, producen la falla global de la estructura. La combinación de carga incluye el valor típico de cargas muertas y vivas y los efectos sísmicos locales.

$$P_f = P(G_f < 0) \quad (1)$$

Donde G_f representa el estado límite del evento para el cual la fuerza actuante excede la resistencia para una combinación de miembros estructurales que causa la inestabilidad global del marco. La probabilidad de falla de marco se calcula, de manera simplificada, de la siguiente manera:

a. La probabilidad de falla incondicional (total) $P_f\,T$ se obtiene a través de la convolución de las probabilidades de falla condicional para las intensidades sísmicas del escenario dado "*a*" y las respectivas probabilidades de ocurrencia de estas intensidades *P(a)* como señalan Ang y Tang (2007). Lo anterior representa la aplicación del teorema de probabilidad total, donde las intensidades "*a*" son una partición del universo de intensidades posibles.

$$P_f T = \int a\ P(G_f < 0)|a)\ P(a)da \quad (2)$$

Cuando se considera sólo un escenario de demanda, como en este artículo, la probabilidad de falla es sólo P_f. Como se describe más adelante, las fuerzas actuantes son las que resultan del análisis espectral de la respuesta donde el espectro a considerar es el recomendado por el Manual de la CFE, como lo plantean Hernández et al. (2016).

b. Si el modo de falla crítico es de flexión, el estado límite corresponde a:

$$G_i = 1 - {M_{acti}}/{M_{ri}} \quad (3)$$

donde M_{acti} y M_{ri} son el momento actuante y resistencia del miembro *i*. Si el modo de falla crítica es el corte, el estado límite corresponde a:

$$G_i = 1 - {V_{acti}}/{V_{ri}} \quad (4)$$

donde V_{acti} y V_{ri} son el cortante actuante y resistente del miembro *i*.

c. Si el estado límite corresponde a la combinación crítica de carga axial y momento flector que ocurre simultáneamente en un miembro:

$$G_i = 1 - {P_{acti}}/{Pri} + {M_{acti}}/{M_{ri}} \quad (5)$$

Donde P_{acti} es la carga axial que actúa y P_{ri} es la fuerza axial resistente, para la combinación más crítica de cargas axiales y momentos que ocurren simultáneamente en todas las columnas del edificio.

d. La incertidumbre se considerará tanto en los elementos mecánicos (fuerzas) actuantes como en los resistentes de acuerdo con Bojorquéz *et a*l (2017). Tanto las variables de carga como las de resistencia se considerarán aquí como lognormales según De León (2010).

e. Como estableció Rosenblueth (1986) para efectos sísmicos el coeficiente de variación, CV, de 0.3 se ha utilizado para los efectos de carga, cortante, la carga axial y el momento flexionante, por lo que se supondrá aquí que tienen un CV = 0.3. Este CV toma en cuenta la incertidumbre en el sismo. Además, se considera que la fuerza axial de resistencia, cortante resistente y el momento flexionante resistente tienen un CV = 0.15. Y los valores esperados de P_{act} y M_{act} se consideran las respuestas estructurales correspondientes al escenario de pseudoaceleraciones espectrales, que se toman como valores medios de la demanda.

En general, la probabilidad de falla P_f, dada cierta intensidad a_i de sismo, $Pfi = P(F | a_i)$, a_i = intensidad sísmica.

La probabilidad de falla, condicional a la intensidad sísmica a_i, se obtiene del análisis de las respuestas máximas y de:

$$P(F|a_i) = P(D > R|a_i) \quad (6)$$

Donde D es la máxima demanda sísmica (lo más desfavorable entre los estados límite de momento, cortante o flexo-compresión) para la intensidad a_i y R la resistencia correspondiente (ambas aleatorias).

El índice de confiabilidad se calcula como:

$$\beta = -\emptyset^{-1}(P_f) \quad (7)$$

Donde $\emptyset^{-1}$ es la función inversa de la distribución normal estandarizada. La expresión (7) es exacta para variables normales, y aproximada para variables no normales.

Una vez obtenidas las respuestas máximas en la estructura, para el escenario i, se obtiene la $P_{fi} = P(F | a_i)$, empleando expresiones cerradas de confiabilidad para variables lognormales explicadas en Ang y Tang (2007) y los valores de los parámetros estadísticos (coeficientes de variación de los efectos símicos y de las propiedades mecánicas de la estructura) se obtienen de la literatura, como en De León e Ismael (2019) e INIFED (2016). El escenario es el recomendado en el programa Prodisis.

Para realizar el cálculo del valor actual del costo del ciclo de vida previsto se utilizará el criterio aplicado en Ang y De León (1997), donde el costo esperado en el ciclo de vida $E(CL)$ se compone del costo inicial C_i (en este caso el costo de reparación) y el valor presente del costo futuro esperado debido a potenciales reparaciones/reconstrucciones de la escuela, una vez que ocurran los sismos esperados en el ciclo de vida de la estructura.

$$E(CL) = C_i + E(C_D) \quad (8)$$

El costo de reparación se estimó a través de un análisis de costo unitario clásico. El costo de las consecuencias del colapso se calcula de la siguiente manera:

$$C_D = C_c + C_F + C_E + C_{in} \quad (9)$$

Donde:

C_C es el costo del contenido del edificio, C_e es el costo de la pérdida de funcionalidad, C_{in} el costo de las lesiones y C_f el costo de las muertes. La estimación de la pérdida de contenido considera el número de escritorios con sillas,

computadoras, pantallas, equipo de proyección y equipo de laboratorio. Los costos típicos están incluidos de proveedores escolares mexicanos (https://todooficina.com/equipamiento/). El costo de la lesión se obtiene utilizando una tasa de 0.0168 / m^2 obtenida por De León y Guadarrama (2020), obteniendo el costo promedio actual de una lesión del Instituto Mexicano del Seguro Social.

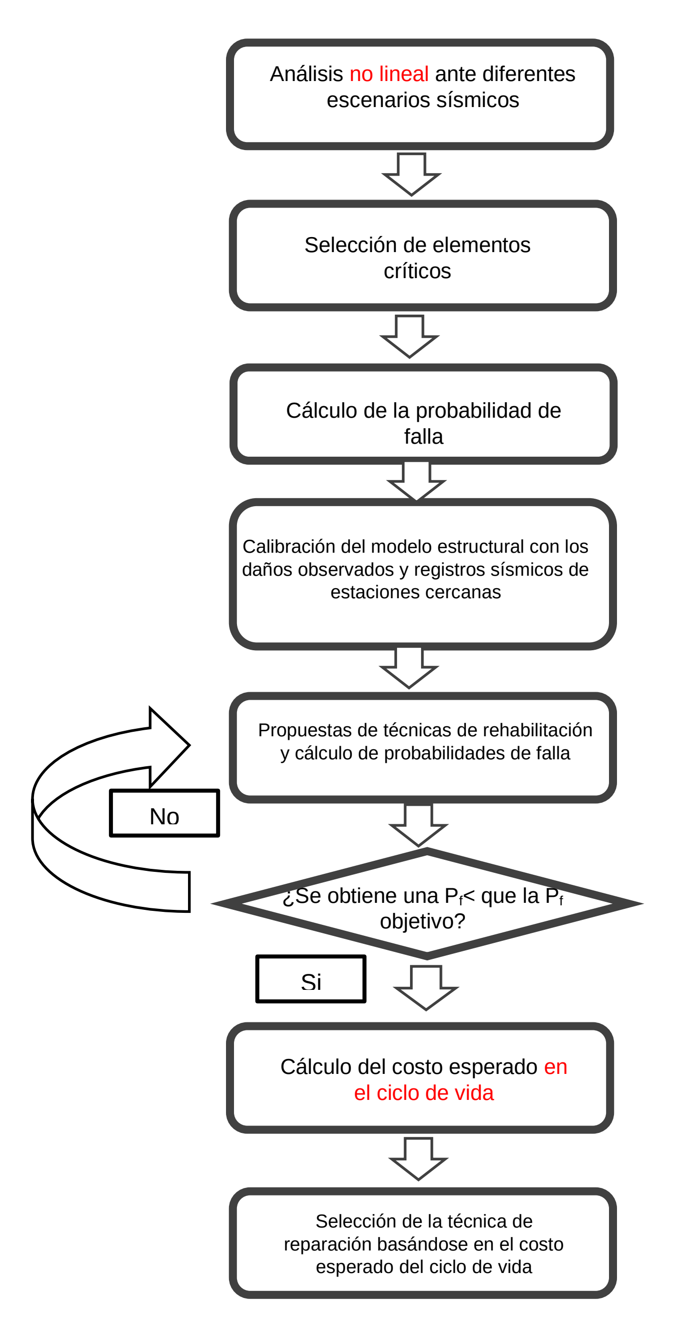


Figura 1 Procedimiento del modelo de reparación propuesto

3 DESCRIPCIÓN DE LAS ESCUELAS

3.1 Escuela 1, Municipio de Tetela del Volcán, Morelos.

El edificio escolar (figura 2) se encuentra en el Municipio de Tetela del volcán, Morelos a una distancia aproximada de 118.0 km desde la Ciudad de México. Consta de un nivel y dos aulas de 7.0 x 7.0 m, está construido de marcos de concreto y muros divisorios de mampostería, cuyas columnas son de 0.45 x 0.30 m, vigas de 0.35 x 0.25 m y ancho de muros de 12 cm.

Las propiedades de los materiales son: resistencia del concreto 250 kg/cm^2, esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo de 4,200 kg/cm^2 y resistencia a la compresión de la mampostería de 14.99 kg/cm^2. La carga viva para la escuela se consideró de 100 kg/m^2 como establece el Gobierno de la Ciudad de México (2017).

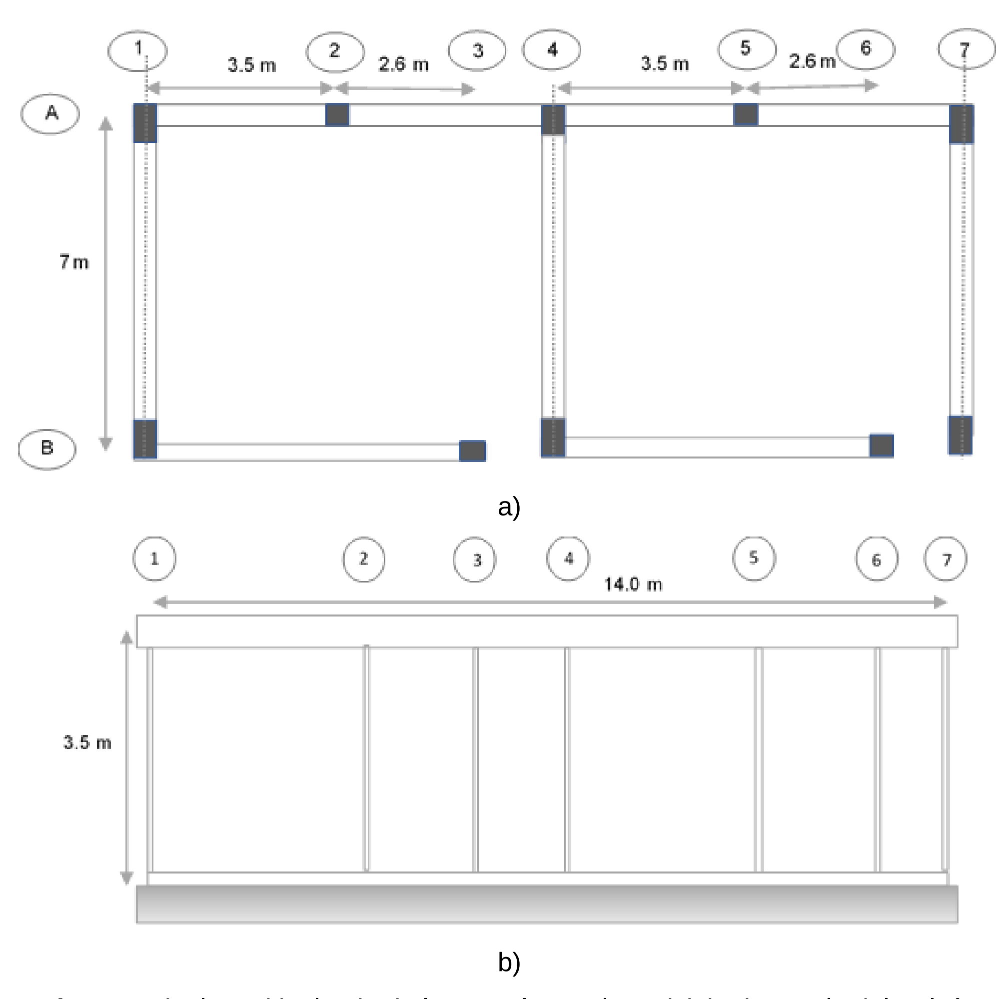


Figura 2 a) Planta b) Alzado de la escuela en el municipio de Tetela del Volcán

3.2 Escuela 2, Municipio de Tehuacán, Puebla.

El edificio escolar (figura 3 y figura 4) se encuentra en el Municipio de Tehuacán, Puebla a una distancia aproximada de 255 km desde la Ciudad de México. Consta de dos niveles con claros de 5.0 m, está construido de marcos de concreto y muros divisorios de mampostería, cuyas columnas son de 0.65 x 0.45 m, vigas de 0.55 x 0.30 m y ancho de muros de 12 cm.

Las propiedades de los materiales son: resistencia del concreto 250 kg/cm^2, esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo de 4,200 kg/cm^2 y resistencia a la compresión de la mampostería de 14.99 kg/cm^2. La carga viva para la escuela se consideró de 100 kg/m^2 como se indica en Gobierno de la Ciudad de México (2017).

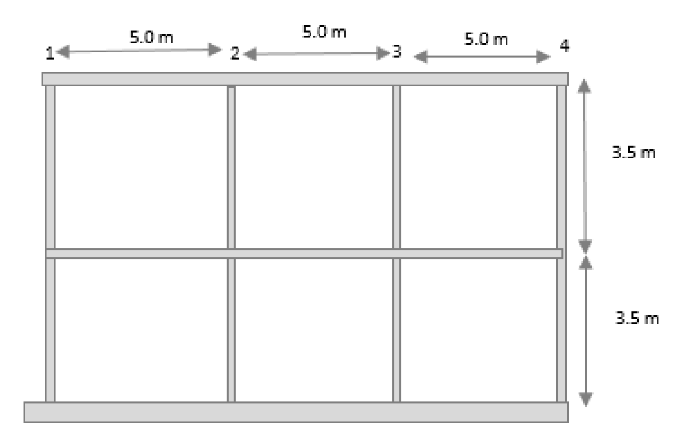


Figura 3 Alzado de la escuela en el municipio de Tehuacán.

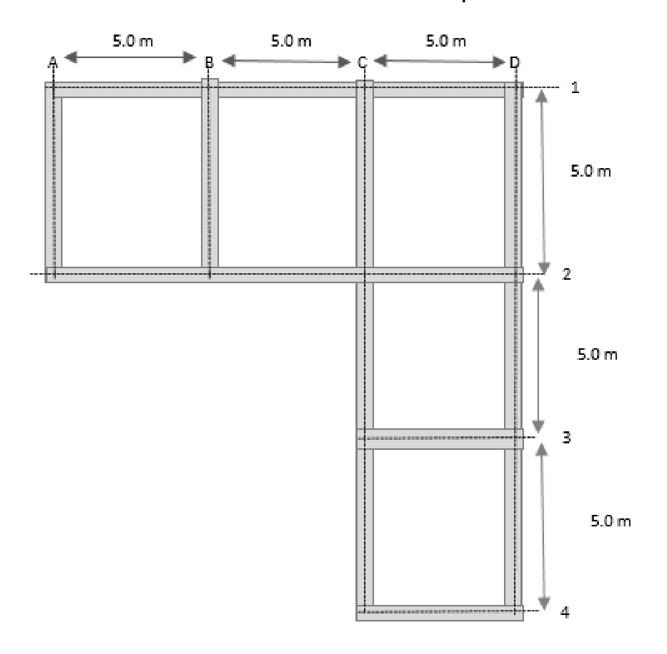


Figura 4 Planta de la escuela en el municipio de Tehuacán.

3.3 Escuela 3, Municipio de Atlatlahucan, Morelos.

El edificio escolar (figura 5 y figura 6) se encuentra en el Municipio de Atlatlahuacan, Morelos a una distancia aproximada de 91.3 km desde la Ciudad de México. Consta de dos niveles con claros de 5.0 m y 7.5m, está construido de marcos de concreto y muros divisorios de mampostería, cuyas columnas son de 0.55 x 0.45 m, vigas de 0.45 x 0.30 m y ancho de muros de 12 cm.

Las propiedades de los materiales son: resistencia del concreto 250 kg/cm^2, esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo de 4,200 kg/cm^2 y resistencia a la compresión de la mampostería de 14.99 kg/cm^2. La carga viva para la escuela se consideró de 100 kg/m^2 como está indicado en Gobierno de la Ciudad de México (2017).

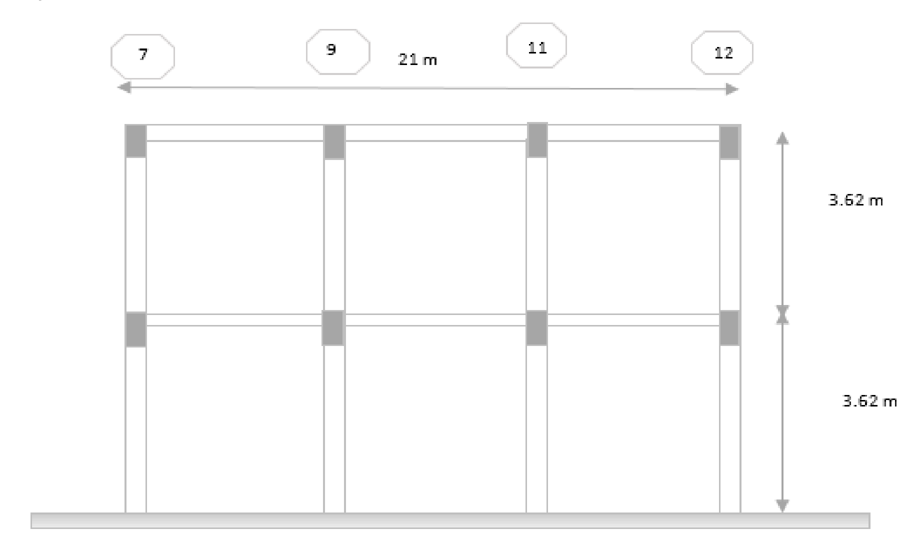


Figura 5 Planta de la escuela en el municipio de Atlatlahuacan.

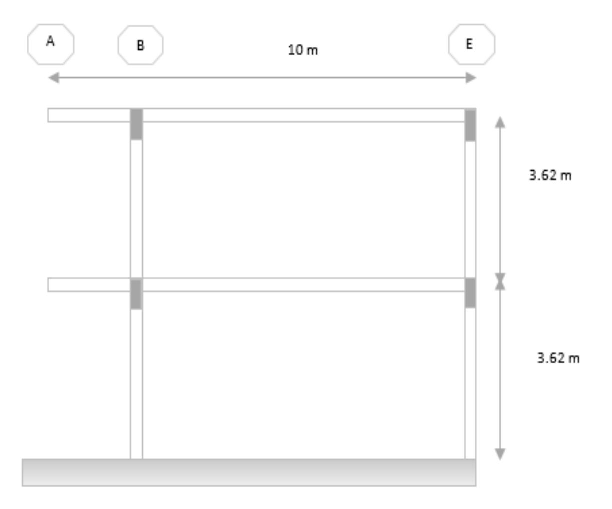


Figura 6 Alzado de la escuela en el municipio de Atlatlahuacan.

3.4 Daños observados

3.4.1 Tetela del Volcán

Los daños principales se presentaron en las columnas 2A y 3B, como se puede apreciar en la figura 7. También se presentaron daños en los muros de los ejes 1, 4 y 7. En la losa se observaron agrietamientos menores a 7 mm cerca de los muros afectados. Las instalaciones pluviales se desprendieron de los muros, la instalación eléctrica no se vio afectada. Se encontraron vidrios rotos y anaqueles caídos.



Figura 7 Daños observados en la escuela ubicada en Tetela del Volcán

3.4.2 Tehuacán

En esta escuela se presentaron daños en los muros de los ejes 1, 7, A y D. En los muros se presentaron agrietamientos de hasta 5 mm a 45° de la base hacia arriba. En las trabes de los ejes 1, 3 y 5 se observaron grietas de 1 cm; Las columnas no presentaron daños En la losa se observaron agrietamientos menores a 1 mm cerca de los muros afectados. Las instalaciones pluviales se desprendieron de los muros, la instalación eléctrica no se vio afectada, algunas de las lámparas se desprendieron de la losa, quedando suspendidas de los cables de la instalación eléctrica. Se encontraron vidrios rotos y anaqueles caídos. En la figura 8 se pueden observar algunos de los daños registrados.



Figura 8 Daños observados en la escuela ubicada en Tehuacán

3.4.3 Atlatlahuacan

En esta escuela se presentaron daños en los muros de los ejes 3, 4, A y D. En los muros se presentaron agrietamientos de hasta 5 mm a 45° de la base hacia arriba. En las columnas de los ejes 3 y 4 se observaron grietas de 1 cm. En la losa

se observaron agrietamientos menores a 7 mm cerca de las trabes afectadas. Las instalaciones pluviales se desprendieron de los muros, la instalación eléctrica no se vio afectada. Se encontraron vidrios rotos y anaqueles caídos. En la figura 9 se pueden apreciar algunos de los daños documentados.



Figura 9 Daños observados en la escuela ubicada en Atlatlahuacan.

4 PELIGRO SÍSMICO

La estimación del peligro sísmico se realizó siguiendo el Manual de Diseño de la CFE, como indican Hernández *et al* (2016) que recomienda calcular la intensidad sísmica en roca a través de los espectros de peligro uniforme. En la figura 10 aparece el diagrama PRODISIS para una de las escuelas y en la figura 11, aparece el registro acelerográfico utilizado.

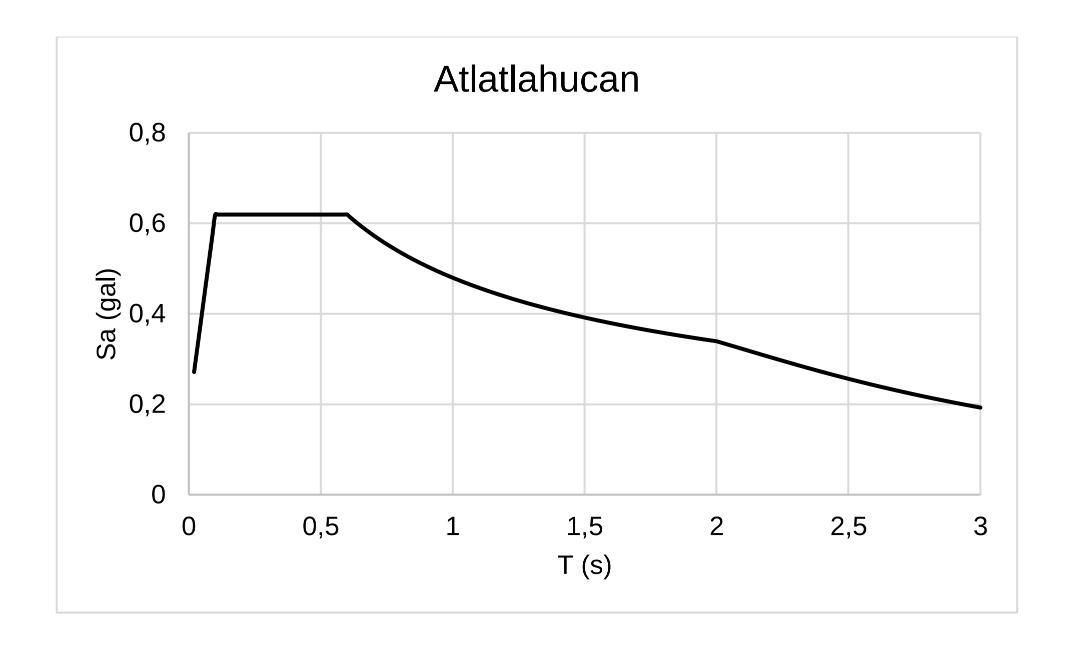


Figura 10 Espectro de peligro uniforme de Atlatlahuacan.

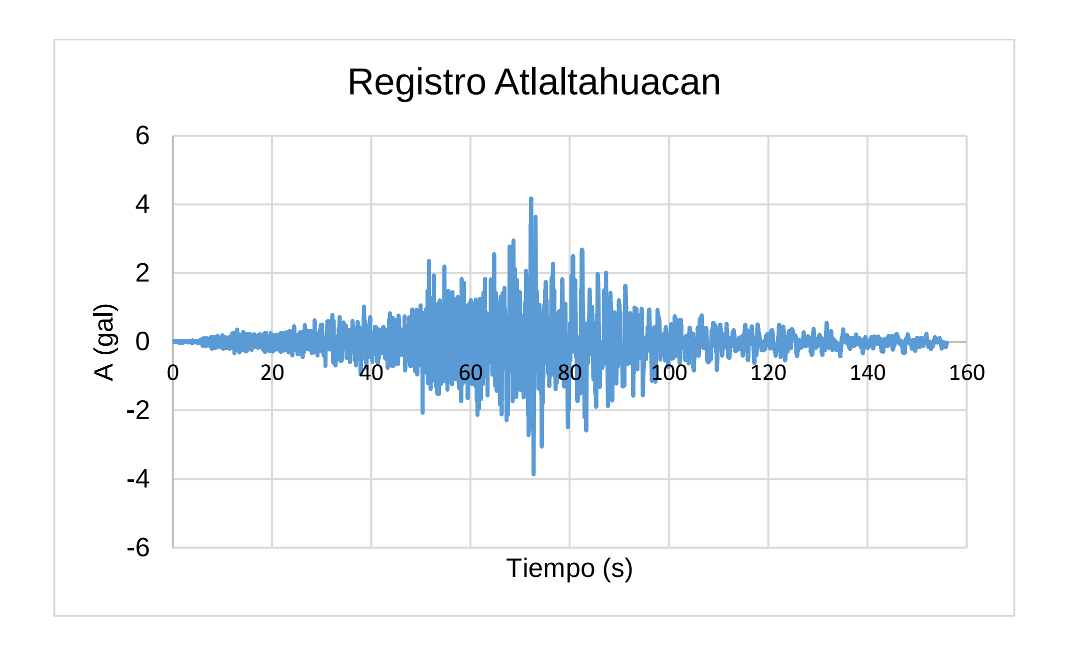


Figura 11 Registro recabado en la estación más cercana a Atlatlahuacan.

Los registros acelerográficos proporcionados han sido producto de las labores de instrumentación y procesamiento de la Unidad de Instrumentación Sísmica del Instituto de Ingeniería de la UNAM, que es la entidad que opera las estaciones de registro. En el presente trabajo, se tomaron los registros de la estación más cercana a cada escuela.

5 RESPUESTA ESTRUCTURAL

5.1 Análisis preliminares

Una serie de análisis preliminares se realizaron para calcular las fuerzas máximas en las columnas y las vigas utilizando los registros existentes del sismo del 19 de septiembre de 2017, en la estación más cercana a cada escuela. Con los resultados de estos análisis preliminares, se identificaron los miembros críticos, el modo de falla gobernante y se calibraron las propiedades mecánicas del miembro dañado, usando los daños observados durante el terremoto de 2017 como comparativa, así como las recomendaciones indicadas por el INIFED en sus guías técnicas, como publicó Alcocer (2021a). Para la escuela ubicada en Atlatlahuacan, los resultados para algunas columnas se presentan en la Tabla 1 y para algunas de las vigas, en la Tabla 2. Para las vigas el cortante resistente es 29 ton y el momento flector resistente es 29.77 ton-m, para las condiciones de daño.

Tabla 1 Resultados de cortante y momento flexionante actuante para algunas columnas en la escuela de Atlatlahuacan.

Elemento	P_{act} kN	(ton)	M_{act} kN-m	(ton-m)
1	61.12	6.23	217.02	22.15
2	55.46	5.66	216.88	22.13

3	57.31	5.84	202.52	20.66
4	57.82	5.90	202.51	20.66
5	55.58	5.67	202.13	20.63
6	55.55	5.67	202.13	20.63
7	57.14	5.83	203.79	20.79
8	57.18	5.83	203.79	20.79
9	71.49	7.29	250.28	25.54
10	68.99	7.04	240.52	24.54

Tabla 2 Resultados para algunas vigas en la escuela de Atlatlahuacan

Elemento	**V_{act} kN**	**(ton)**	**M_{act} kN-m**	**(ton-m)**
1	20.05	2.05	114.06	11.63
2	22.34	2.28	114.21	11.65
3	17.02	1.74	96.79	9.87
4	18.72	1.91	106.51	10.86
5	21.21	2.16	115.35	11.76
6	16.29	1.66	92.68	9.45
7	18.50	1.89	105.22	10.73
8	20.55	2.10	112.35	11.46
9	15.80	1.61	89.90	9.17
10	21.32	2.17	121.28	12.37

5.2 Probabilidad de falla bajo condiciones de daño.

A partir de las respuestas máximas, se calculó la probabilidad de falla para cada elemento con el procedimiento descrito anteriormente; La Tabla 3 muestra los resultados de la escuela Atlatlahuacan para la demanda sísmica del terremoto del 19 de septiembre de 2017.

Tabla 3 Índices de confiabilidad para condiciones dañadas en algunos elementos de la escuela de Atlatlahuacan

Columna	**P_{act}/P_r**	**M_{act}/M_r**	β
1	0.03	0.42	3.03
2	0.03	0.42	3.04
9	0.04	0.48	2.56
10	0.04	0.46	2.69
Viga	**V_{act}/V_r**	**M_{act}/M_r**	β
1	0.07	0.37	3.40
10	0.07	0.39	3.19

Aplicando las ecuaciones (2) a (7) se obtiene la probabilidad de falla, para condiciones dañadas para cada elemento. Dado que las escuelas pertenecen a un grupo importante de estructuras, para este trabajo se utiliza un criterio conservador por lo que la P_F global se igualará a la P_f máxima de los elementos, para cada una de las tres escuelas. Estos resultados se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4 Probabilidades de falla máximas para cada una de las tres escuelas.

Escuela	P_f
Atlatlahuacan	0.032
Tetela del Volcán	0.041
Tehuacán	0.026

Los valores de la tabla 4 están muy encima de los recomendados de 0.003, para estructuras de este tipo, de acuerdo a trabajos previos, como en ISO (1998), Ang y De León (1997) y en De León y Guadarrama (2020). Por ello, las escuelas requieren reparación.

5.3 Alternativas de rehabilitación

El costo de reparación y mejoramiento C_R para un daño moderado se estimó para cada elemento de concreto dañado empleando mortero epóxico. Para un daño medio, el costo de reparación de los elementos de concreto se estima considerando la demolición y reconstrucción empleando la misma sección transversal o mayor considerando los costos de los elementos agregados; y para daños severos, el costo de reparación se estimó como si los miembros de concreto dañados con mayor probabilidad de falla fueran demolidos y reconstruidos con una sección transversal más grande y estimando el costo de los elementos agregados. Para todos los casos se consideró que los muros dañados serían demolidos y reconstruidos. Estos costos se calcularon con un análisis de costo unitario clásico, con costos al 2020, utilizando los rendimientos proporcionados por el Centro Nacional de Ingeniería de Costos de la Cámara Nacional de la Industria de la Construcción de México (http://cmic.org/ceico). Los elementos tratados para la escuela de Atlatlahuacan se identifican en la figura 12. En las siguientes subsecciones, se describen estrategias de rehabilitación para la escuela de Atlatlahuacan, como ejemplo.

5.3.1 Rehabilitación uno

La estrategia de reacondicionamiento uno, para Atlatlahuacan, consistió en el refuerzo de las columnas 9 y 10 y vigas 1 y 10. Para las columnas se agregaron 4 ángulos de acero A-36 6” x 6” x 3/8” y para las vigas 4 ángulos se agregaron en las esquinas de A-36 2”X2”X3/8” / 8 5 ". Se consideró la utilización de anclas y pernos para la fijación; la figura 13 muestra un boceto.

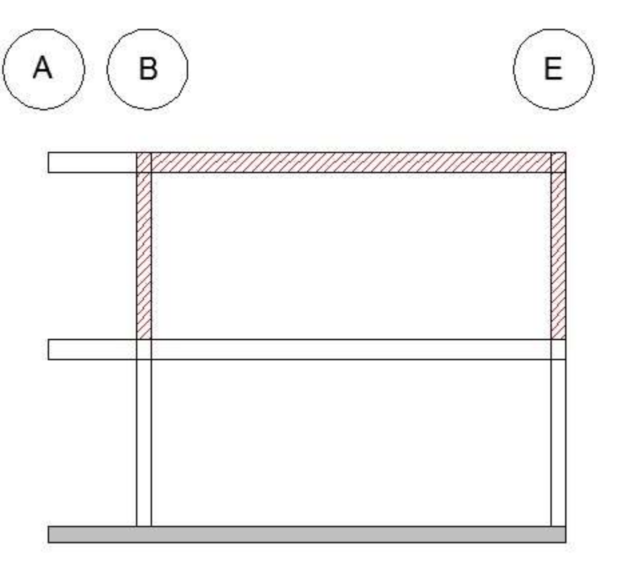


Figura 12 Elementos tratados en la escuela de Atlatlahuacan en el Eje 7.

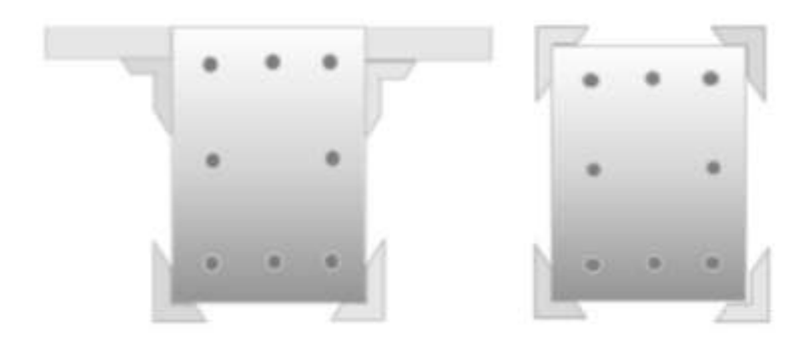


Figura 13 Propuesta de rehabilitación uno, refuerzo con ángulos de acero.

Tabla 5 Propiedades geométricas de las secciones propuestas para la escuela en Atlatlahuacan.

	Columna	Viga	Unidades
A	0.276	0.1646	m^2
J	9.14E-03	2.45E-03	m^4
I33	9.15E-03	3.77E-03	m^4
I22	3.80E-03	8.79E-03	m^4
S33(+cara)	2.86E-02	1.13E-01	m^3
S33(-cara)	2.86E-02	1.13E-01	m^3
S22(+cara)	1.90E-02	1.30E-02	m^3
S22(-cara)	1.90E-02	1.30E-02	m^3

Z33	4.35E-01	1.88E-02	m^3
Z22	2.84E-02	9.09E-03	m^3
r33	1.82E-01	1.67E-01	m
r22	1.17E-01	8.08E-02	m

Las propiedades geométricas (área A, constante de torsión J, momentos de inercia I, módulo de sección S, módulo de plástico Z y radio de giro r) se calcularon, como propiedades equivalentes para incluir los ángulos de acero, para las nuevas secciones y se utilizaron para realizar los nuevos análisis. La Tabla 5 muestra estas propiedades.

5.3.2 Rehabilitación dos

La estrategia de reparación dos consistió, para las columnas 9 y 10, en el incremento del tamaño de la sección a 65 x 45 cm y, para las vigas 1 y 10 incrementar a 45 X 40 cm; vea la figura 14 para el croquis y la Tabla 6 para las propiedades estructurales. Se consideró la utilización de adhesivo tixotrópico de dos componentes a base de resina epoxi, concreto de 250 kg/cm2.

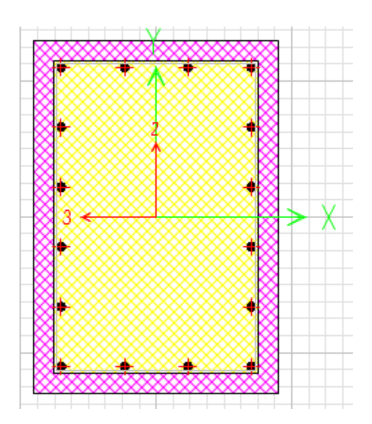


Figura 14 Propuesta de reparación 2 para las columnas de Atlatlahuacan.

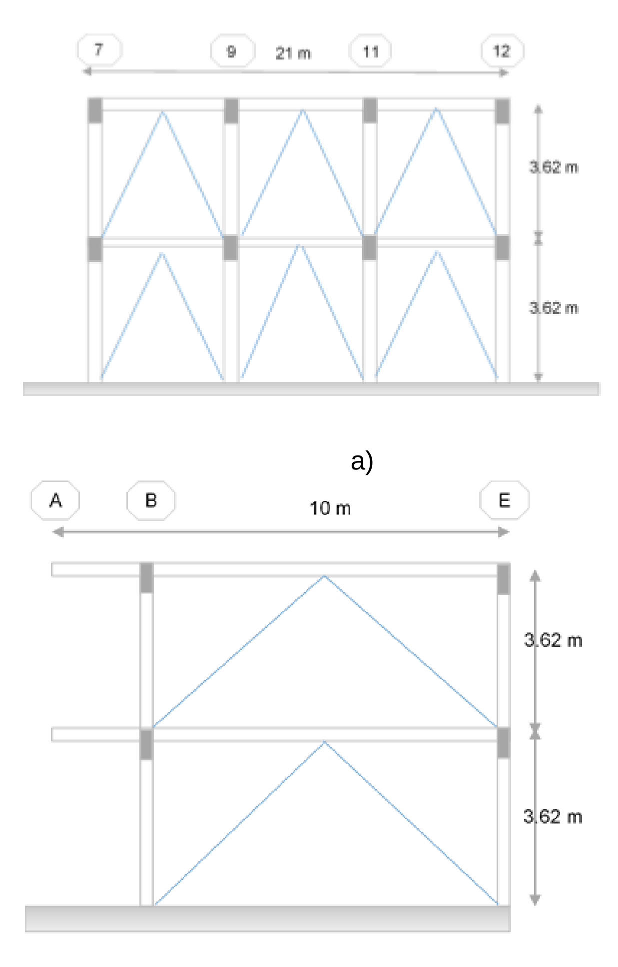
Tabla 6 Propiedades geométricas de las secciones propuestas para la escuela en Atlatlahuacan.

	Columna	Viga	Unidades
A	0.2925	0.175	m^2
J	0.0133	4.07E-03	m^4
I33	0.0103	3.64E-03	m^4
I22	4.93E-3	1.78E-03	m^4
S33(+cara)	0.0317	1.46E-02	m^3
S33(-cara)	0.0317	1.46E-02	m^3
S22(+cara)	0.0219	1.1E-02	m^3
S22(-cara)	0.0219	1.1E-02	m^3

Z33	0.0475	2.19E-02	m^3
Z22	0.0329	1.53E-02	m^3
r33	0.1876	1.44E-01	m
r22	0.1299	1.01E-02	m

5.3.3 Rehabilitación tres

La estrategia de reparación tres consistió en la adición de contravientos de acero en las bahías críticas; vea las figuras 15 y 16 para las vistas y la sección transversal de los arriostramientos y la Tabla 7 para las propiedades estructurales del arriostramiento. Las secciones tubulares se verificaron contra pandeo local y global. Se propone un perfil OR de 6" x 6" x 5/16", placa de espesor 5/16" y fijación con anclas y pernos.



b)

Figura 15 Distribución de contravientos. a) Alzado posterior b) alzado lateral

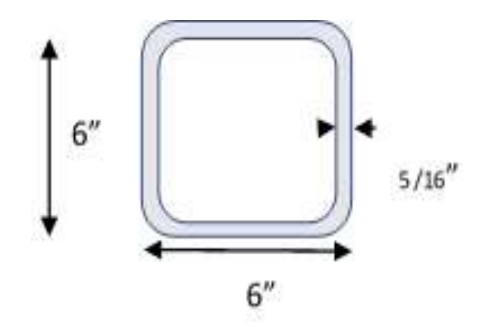


Figura 16 Sección de contraviento propuesta

Tabla 7 Propiedades geométricas de las secciones propuestas para la escuela en Atlatlahuacan.

Propiedades geométricas		
A	4.58 E-3	m^2
J	2.39 E-05	m^4
I33	1.60 E-05	m^4
I22	1.60 E-05	m^4
S33	2.1 E-04	m^3
S22	2.10E-04	m^3
Z33	2.48E-04	m^3
Z22	2.48E-04	m^3
r33	0.059	m^3
r22	0.059	m^3

5.3.4 Costo de la rehabilitación.

El costo de las tres alternativas de reparación se estimó mediante procedimientos clásicos de costo unitario, incluidos materiales, mano de obra y otros costos pertinentes, a costos de 2020. La Tabla 8 muestra los resultados.

Tabla 8 Costo de trabajos de rehabilitación para cada escuela.

	Tehuacán	Atlatlahuacan	Tetela del Volcán
R1	$ 236,689	$ 85,437	$ 135,625
R2	$ 134,781	$ 78,182	$ 91,483
R3	$ 341,603	$ 114,044	$ 227,621

6 PROBABILIDADES DE FALLA REDUCIDAS DESPUÉS DE LA REHABILITACIÓN.

Para el primer reacondicionamiento se utilizaron ángulos de acero, para la segunda se propuso un incremento en la sección de concreto y acero de refuerzo; y para el tercero se propuso la colocación de contravientos. Reevaluando las respuestas estructurales y las probabilidades de falla local, para las tres escuelas y las tres alternativas de reparación, se calcularon las nuevas probabilidades de falla global; vea los resultados en la Tabla 9.

Tabla 9 Probabilidades de falla calculadas tomando en cuenta la rehabilitación.

	P_f		
Escuela	Propuesta 1	Propuesta 2	Propuesta 3
Atlatlahuacan	0.00289	0.00295	0.00293
Tetela del volcán	0.00287	0.00287	0.00292
Tehuacán	0.002312	0.00262	0.00263

Estas probabilidades de falla son adecuadas, conforme al límite previamente mencionado de 0.003, en la sección 5.2

7 COSTOS DE LAS CONSECUENCIAS DE FALLA Y ELECCIÓN DE LA TÉCNICA DE REPARACIÓN

El costo de las consecuencias de daños / fallas, C_D, incluye el costo de los contenidos dañados, C_C, el costo de las posibles muertes, C_F, el costo de trasladar las actividades educativas a otras instalaciones mientras se realizan las reparaciones / reconstrucción C_E, y el costo de las lesiones con C_{in}, de acuerdo a la ecuación (9). (Ver Tabla 10).

Tabla 10 Costo de consecuencia de falla estimados para cada escuela.

	Tehuacán	**Atlalhuacan**	**Tetela del Volcán**
C_c=	$51,645	$51,185	$154,936
C_e=	$37,072	$66,692	$148,627
C_{in}=	$231,333	$415,214	$925,334
C_F=	$288,850,457	$289,324,962	$292,054,317
C_D=	$289,170,508	$289,858,054	$293,283,215

En la figura 17 se puede apreciar que el costo con mayor participación es el costo relacionado a las fatalidades.



Figura 17 Gráfica de distribución de costos**.**

La reparación óptima corresponde al costo mínimo esperado del ciclo de vida entre todas las alternativas propuestas; es decir, *E(CL)* se evalúa para estas alternativas, a través de la ecuación (8) donde el valor presente del costo esperado de daño/falla $E(C_D)$ se obtiene en términos de los costos de daño/falla C_D , la probabilidad de falla y el factor de valor presente *PVF*:

$$PVF = (1 - \exp(-rT))/r \qquad (10)$$

donde *r* = 8% es la tasa de interés anual neta y *T* = 50 años la vida útil del diseño de la escuela. Así,

$$E(C_D) = (C_D)(P_f)(PVF) \qquad (11)$$

La Tabla 11 muestra los costos del ciclo de vida esperados para las alternativas propuestas.

Tabla 11 Costos estimados del ciclo de vida esperado para las alternativas de reparación de cada escuela.

	Tehuacán		Atlatlahuacan		Tetela del Volcán	
R1	$	825,472	$	1,034,471	$	1,007,197
R2	$	935,416	$	1,055,788	$	1,039,443
R3	$	939,103	$	1,049,122	$	1,058,297

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se propone un procedimiento basado en la confiabilidad y los costos del ciclo de vida esperado para comparar la efectividad de las alternativas de rehabilitación en escuelas ubicadas en zonas con peligro sísmico.

El procedimiento considera, de manera explícita, el costo de las consecuencias de las fallas y las incertidumbres involucradas haciendo énfasis en las del peligro sísmico.

La rehabilitación escogida depende del nivel de exposición sísmica por lo cual una selección más conservadora corresponde al alto nivel sísmico y al nivel de las consecuencias de la falla.

El componente de costo que tuvo mayor peso en el costo de falla fue el costo de fatalidad; esto confirma que la vida de los estudiantes y profesores es la variable más importante en las consecuencias de falla para las escuelas.

La probabilidad de falla para acciones sísmicas bajó de 0.032 hasta 0.00289 en Atlatlahuacan, en Tételа del Volcán de 0.041 hasta 0.00287, y en Tehuacán de 0.026 a 0.002312.

Para las escuelas consideradas en este trabajo el modo de falla que resultó más crítico fue el momento flexionante, cuya relación de momento actuante versus resistente fue 10 veces mayor que los otros elementos mecánicos revisados.

El esquema de reparación que menor costo presentó fue la rehabilitación con ángulos de acero (propuesta 1).

El procedimiento puede considerar deficiencias específicas en los componentes estructurales, lo cual se refleja en el cálculo de las capacidades de los mismos.

Asimismo, el procedimiento puede tomar en cuenta, con ligeras modificaciones, la combinación de 2 o más estrategias de reparación, mediante la adición de ecuaciones para los estados límite, que actuarían como restricciones en un problema de optimización formulado mediante programación lineal.

Se recomienda extender el procedimiento para considerar otros tipos de estructuras escolares y otras zonas sísmicas a las aquí estudiadas, para generar recomendaciones para elevar el nivel de seguridad de estas estructuras en todo el país.

9 REFERENCIAS

Aguiar R., Rivas-Medina A. e Iza E. (2018) *Determination of spectros and earthquakes for the design of Quinindé hospital with seismic isolators*. Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras. Vol. 23, 1, 73-100, DOI: http://dx.doi.org/10.24133/riie.v23i1.706

Alcocer S. (2021a) *Rehabilitación sísmica de la infraestructura física educativa de México.* Guía Técnica. II-UNAM, INIFED, Banobras.

Alcocer S. (2021b) *Evaluación postsísmica de la infraestructura física educativa de México. Vol*. II-UNAM, INIFED, Banobras. http://www.resilienciasismica.unam.mx/docs/Evaluacion_Guia_TecnicaDIGITAL130221.pdf

Ang, A.H.-S. y Tang W. H. (2007). *Probability Concepts in Engineering Planning and Design Emphasis on Applications to Civil and Environmental Engineering*, Vol. I, 2nd. Edition. John Wiley and Sons, ISBN-13: 978-0471720645.

Ang, A.H.-S. y De Leon, D., (1997) *Determination of optimal reliabilities for design and upgrading of structures.* Structural Safety, Vol. 19A, pp. 91-103.

ASCE/SEI 41-06 (2014), *Seismic Rehabilitation of Existing Buildings*. ISBN 978-0-7844-1285-5, ASCE. http://dx.doi.org/10.1061/9780784412855.

Bazán, E. y Meli, R. (2001), *Diseño sísmico de edificios*, Ed. Limusa, Distrito Federal, México.

Bojórquez, J, S E Ruiz, B Ellingwood, A Reyes-Salazar y E Bojórquez (2017*), "Reliability-based optimal load factors for seismic design of buildings",* Engineering and Structures, No. 151. pp. 527-539. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.08.046.

Bozzo, L. M. y Barbat, A. H. (2004), *Diseño sismorresistente de edificios*. Técnicas convencionales y avanzadas, Ed. Reverté, Barcelona, España.

Chavez-García F. J., Sánchez-Sesma F., M. Campillo M. y Bará E.-Y. (1994). *El terremoto de Michoacán de septiembre de 1985: efectos de fuente, trayecto y sitio*. Física de la Tierra, Núm. 6. 157-200. Editorial Complutense, Madrid, 1994.

D´Ayala D., Nassirpour A. and Galasso C. (2020) *Comparative analysis of retrofitting strategies to reduce seismic loss of school facilities to reduce seismic loss of school facilities*. Procs. of the 17th. World Conference on Earthquake Engineering, Sendai, Japan.

Del Vecchio C., Frascadore R., Menna C., Mauro G. M., Di Ludovico M., Di Sarno L., Bianco N., Prota A. and Dolce M. (2021). *Towards the seismic and energy retrofitting of existing school buildings via an integrated design procedure*. Procs. of the 17th. World Conference on Earthquake Engineering, Sendai, Japan.

De León-E. D. e Ismael-H. E. (2019) *Reliability-based procedure for optimal repair of steel frame-masonry walls structures for schools with seismic damage*. Enviado a Earthquakes and structures, Techno Press.

De León-E. D. (2010) *Basis for Risk Management of bridges exposed to seismic loading*. Procs. of the 5th. IABMAS, Philadelphia, Pennsylvania, USA

De León-E. D y Guadarrama, A. D. (2020) *Towards a resilient design and retrofit of schools in Mexico*. Procs. 17th World Conference on Earthquake Engineering, Sendai, Japan.

Esteva L., Díaz O., García-Pérez J., Sierra G. e Ismael E. (2002), *"Life-cycle optimization in the establishment of performance-acceptance parameters for seismic design*", Structural Safety, 24 (2- 4: Volumen especial), pp. 187-204.

Gobierno de la Ciudad de México (2017) *Normas Técnicas Complementarias, Reglamento de Construcciones para la Ciudad de México*. México.

Gobierno del Estado de Morelos. (2020) *Reglamento de construcción y seguridad estructural para el estado de Morelos*. Cuernavaca, Morelos.

Godínez E., Tena A., Archundia H., Gómez A., Ruíz R. y Escamilla J. (2019). *Structural damage in housing and apartment buildings located in the Southeast of Mexico due to the september 7th, 2017 Tehuantepec earthquake, Mw=8.2* Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras. Vol. 24, 2, 223-258. DOI: http://dx.doi.org/10.24133/riie.v24i2.1285

Gutiérrez, C., Quaas, R., Ordaz, M., Guevara, E., Muriá, D. y Krishna, S. (2011), *Sismos*. Serie Fascículos, 5a ed., Centro Nacional de Prevención de Desastres, Distrito Federal, México.

González Costa Zacarias, *Verificación de la fiabilidad estructural en estructuras ejecutadas mediante metodología probabilista*. Universidad de Coruña. 2016.

Hernández U., Pérez R. L. E., Aguilera M. D., Alarcón N. A., Albavera C. M., Arzola, I., Fortunio J., García C. J., Hernández G., García A. M. N., Picazo G. Y., González D. P. N., Ramírez A. R., Ruedas M. A. R. (2016). C.1.3: *Manual de Diseño de Obras Civiles*, CFE.

Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa, INIFED (2016). *Guía para elaborar o actualizar el Programa Escolar de Protección Civil*. http://www.seducoahuila.gob.mx/proteccioncivilescolar/assets/guia-programa- escolar-de-proteccion-civil.pdf.

ISO 2394: 1998. (1998) *General principles on reliability for structures*. Geneve, Switzerland: ISO.

Jaimes M. A. and Niño M. (2017). *Cost-benefit analysis to assess seismic mitigation options in Mexican public school buildings*. Bulletin of Earthquake Engineering 15(5):1-24, DOI: 10.1007/s10518-017-0119-5

Morales González, Edwin. (2019) *Tiempos de recuperación estructural para la evaluación de la resiliencia sísmica en escuelas del sector público*, tesis para obtener el título de Licenciado en Ingeniería Civil. UNAM, México.

Monserrat B. A., Gómez B A., Juárez G. H. (2021) *Seismic hazard analysis and site effects for Guadalajara metropolitan area.* Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras. 26(1), 89-123. http://dx.doi.org/10.24133/riie.v26i1.1960

Pérez-Gavilán J. J., Aguirre J y Ramírez L. (2018) Sismicidad y seguridad estructural en las construcciones: lecciones aprendidas en México. Salud pública Méx. 60(1). Cuernavaca, Méx. https://doi.org/10.21149/9300

Pozos-Estrada A, Gómez Martínez Roberto and Hong Hanping. (2014). *Desagregación del peligro sísmico para algunos sitios seleccionados de México.* Ingeniería sísmica no.91 México. DOI:10.18867/ris.91.178

Reinoso E. y Jaimes M. A. (2009) *Criterios para obtener acelerogramas de diseño en sitios afectados por varias fuentes sísmicas usando como ejemplo el caso de terreno firme de la Ciudad de Mexico*. Ing. sísm (81). DOI:10.18867/ris.81.73

Rosenblueth E. (1986) *Optimum reliabilities and optimum design, Structural Safety* 3(2), pp. 69-83.

Singh, S. y Ordaz, M. G. (1994), *Sismicidad y movimientos fuertes en México: Una visión actual*, Centro Nacional de Prevención de Desastres, Distrito Federal, México.

Sousa I., Falcão M. R., Castro J. M. and Bento R. (2020). *Assessment of retrofitting techniques for seismically vulnerable RC buildings in Portuga*l. Procs. of the 17th. World Conference on Earthquake Engineering, Sendai, Japan.

Tena C. A. (2020) *Moving forward from collapse-prevention seismic design towards resilient seismic design*. Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras. 25(4), pp. 521-56. Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras. DOI: http://dx.doi.org/10.24133/riie.v25i4.1862